

УДК 669.02/09: 621.746+519

Сущенко А.В.¹, Безчерев А.С.²

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ И РАЗОГРЕВА ФУТЕРОВКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ КОВШЕЙ

Разработана математическая модель процессов сушки и разогрева футеровки металлургических ковшей, позволяющая решать задачи оптимизации существующих и разработки новых режимов их тепловой обработки.

Современное металлургическое производство предполагает широкое использование для транспорта, выпечной обработки и разлива металла ковшей различных типов: чугуновозных, чугунозаливочных, сталеразливочных, промежуточных, литейных и др. При этом тепловое состояние ковша, формируемое в процессе его подготовки (сушки и/или разогрева перед приёмом жидкого металла) оказывает существенное влияние как на технико-экономические показатели технологического процесса (тепловые потери, стабильность температурного режима металла и т.п.), так и на эксплуатационные характеристики самих ковшей (стойкость футеровки и т.п.). Кроме того, оптимизация параметров тепловой подготовки ковшей неразрывным образом связана с вопросами экономии топлива и снижения вредных выбросов в окружающую среду.

Решение рассматриваемых задач наиболее эффективно может быть осуществлено на основе математического моделирования с использованием современных численных методов.

При разработке математической модели процессов сушки и разогрева футеровки ковша топливным факелом основывались на нижеследующих положениях. Тепловой поток на внутреннюю поверхность футеровки ковша определяется результатом сложного лучистого теплообмена в системе "продукты сгорания топлива (факел) – футеровка стен – футеровка днища – крышка (окружающая среда)", а также вынужденной конвекции продуктов сгорания топлива в полости ковша, удаляемых из него через зазор под крышкой (горловину ковша). Теплоперенос в футеровке происходит за счёт нестационарной теплопроводности; теплоотдача от металлического корпуса ковша в окружающую среду (воздух) – путём излучения и естественной конвекции. При этом были приняты следующие допущения: 1) температура продуктов сгорания на выходе из агрегата равна эффективной температуре газа в ковше (модель "размытого факела"); 2) учитывая, что для стен ковша отношение наружного и внутреннего диаметров футеровки $< 1,2$, последняя (при решении задачи теплопроводности) была представлена в виде двухслойной неограниченной пластины; 4) в процессе сушки зона фазового перехода (поверхностной и капиллярной влаги в пар) представлена в виде изотермической (при температуре фазового перехода) фронтальной поверхности, разделяющей зоны влажного и просушенного материала, со скачкообразным изменением влагосодержания на самом фронте; 5) в связи с отсутствием достоверной информации о коэффициентах тепло- и влагопереноса во влажном материале в процессе его сушки [1] было введено понятие эффективного коэффициента теплопроводности влажного материала, величину которого определяли на основе обработки экспериментальных данных.

Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, базовыми из которых являются уравнения теплового баланса газовой фазы в полости ковша и нестационарной теплопроводности в футеровке стен, днища и крышке с соответствующими граничными условиями, а также уравнение движения фронта сушки:

$$Q_H^P \cdot B(\tau) \cdot d\tau = \sum_{i=1}^N q_{\Gamma i} \cdot F_i \cdot d\tau + t_r \cdot c_r(t_r) \cdot V_r \cdot B(\tau) \cdot d\tau, \quad (1)$$

¹ ПГТУ, ст. науч. сотр.

² ПГТУ, ассистент.

$$\rho_i(t) \cdot c_i(t) \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_i(t) \frac{\partial t_i}{\partial x} \right], \quad i \neq 1, \quad (2)$$

$$-\lambda_i(t) \frac{\partial t_i}{\partial x} \Big|_{i-\Gamma} = q_{\Gamma i} + q_{pi}, \quad (3)$$

$$-\lambda_i(t) \frac{\partial t_i}{\partial x} \Big|_{i-oc} = q_{ioc}, \quad (4)$$

$$\rho_1(t,u) \cdot c_1(t,u) \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_1(t,u) \frac{\partial t_1}{\partial x} \right], \quad i = 1, \quad x \neq x_{\text{фр}}, \quad (5)$$

$$-r \cdot U \cdot \rho_1(t,u) \frac{\partial x}{\partial \tau} \Big|_{x=x_{\text{фр}}} = \lambda_1(t,u) \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=x_{\text{фр}+0}} - \lambda_1(t,u) \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=x_{\text{фр}-0}}, \quad x = x_{\text{фр}}, \quad (6)$$

$$t_1 \Big|_{x=x_{\text{фр}}} = t_{\text{ф.п.}}, \quad (7)$$

$$-\lambda_1(t,u) \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{1-\Gamma} = q_{\Gamma 1} + q_{p1}, \quad (8)$$

$$-\lambda_1(t) \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{1-oc} = q_{1oc}, \quad (9)$$

где τ - время; x - координата по толщине футеровки, направленная к центру ковша; Q_H^P - теплота сгорания топлива; $B(\tau)$ - расход топлива; N - число объектов теплообмена, окружающих свободный объём ковша; q_{pi} - плотность результирующего теплового потока к внутренней поверхности i -ого объекта площадью F_i от внутренних поверхностей остальных объектов; $q_{\Gamma i}$ - плотность результирующего теплового потока от газа к внутренней поверхности i -ого объекта; q_{ioc} - плотность теплового потока от наружной поверхности i -ого объекта в окружающую среду; $c_r(t_r)$ - удельная объёмная изобарная теплоёмкость продуктов сгорания; V_r - выход продуктов сгорания при заданном коэффициенте расхода воздуха α ; ρ_i , c_i , λ_i - плотность, удельная массовая теплоёмкость, коэффициент теплопроводности соответственно материала i -ого объекта; u - влажность материала футеровки стен ковша (мас. доля); U - изменение параметра u на фронте сушки; Γ - теплота фазового перехода (испарения) воды при температуре фазового перехода $t_{\text{ф.п.}}$. При этом индексы соответственно относятся: "1" - к объекту "стены", "фр" - к поверхности фронта испарения (сушки), "oc" - к параметрам окружающей среды.

Соответствующие плотности тепловых потоков можно представить в виде:

$$q_{\Gamma i} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_r(t_r) \cdot \varepsilon_i \cdot [(t_r + 273)^4 - (t_i \Big|_{i-\Gamma} + 273)^4] + \alpha_{\Gamma i} \cdot (t_r - t_i \Big|_{i-\Gamma}), \quad (10)$$

$$q_{pi} = \sigma_0 \sum_{j=1}^N \{ \varepsilon_j \cdot \varepsilon_i \cdot \varphi_{ij} \cdot [(t_j \Big|_{j-\Gamma} + 273)^4 - (t_i \Big|_{i-\Gamma} + 273)^4] \}, \quad (11)$$

$$q_{ioc} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{ni} \cdot [(t_i \Big|_{i-oc} + 273)^4 - (t_{oc} + 273)^4] + \alpha_{ioc} \cdot (t_i \Big|_{i-oc} - t_{oc}), \quad (12)$$

где σ_0 - постоянная Стефана-Больцмана; t_r , $\varepsilon_r(t_r)$ - температура и степень черноты газа; t_{oc} - температура окружающей среды; ε_i , ε_j - степени черноты внутренних поверхностей i -ого и j -ого объектов соответственно; ε_{ni} - степень черноты наружной поверхности i -ого объекта; φ_{ij} - угловой коэффициент излучения между внутренними поверхностями i -ого и j -ого объектов; $\alpha_{\Gamma i}$ - коэффициент конвективной теплоотдачи от газа к внутренней поверхности i -ого объекта; α_{ioc} - коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной поверхности i -ого объекта в окружающую среду.

Начальные условия процесса сушки (с последующим разогревом) определяются равномерным распределением: а) влаги в рабочем и арматурном слоях футеровки стен и б) темпер

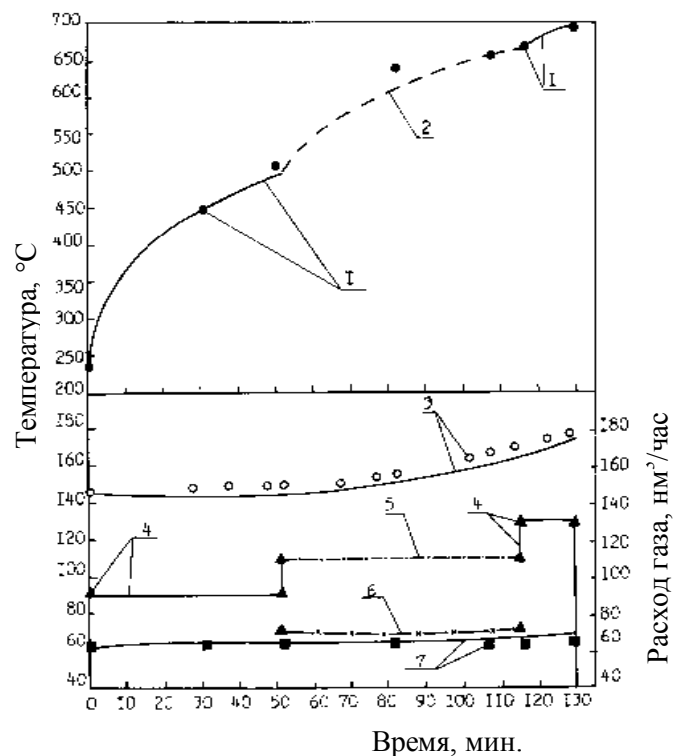


Рис. 1 - Динамика температур в характерных точках 220-т сталеразливочного ковша с набивной футеровкой в процессе межплавочного разогрева природным газом (при использовании на втором этапе импульсного режима отопления [2]):

1, ● – температура внутренней поверхности футеровки стен; 2 – то же, при импульсном отоплении (осреднённая); 3, ○ – температура на стыке рабочего и арматурного слоёв футеровки стен; 4, ▲ – расход природного газа; 5, 6 – то же, максимальное и минимальные значения при импульсном отоплении; 7, ■ – температура корпуса стен; линии – результаты расчётов, точками отмечены экспериментальные данные (●, ○, ■ – отвечают средней по высоте стен ковша точке замера).

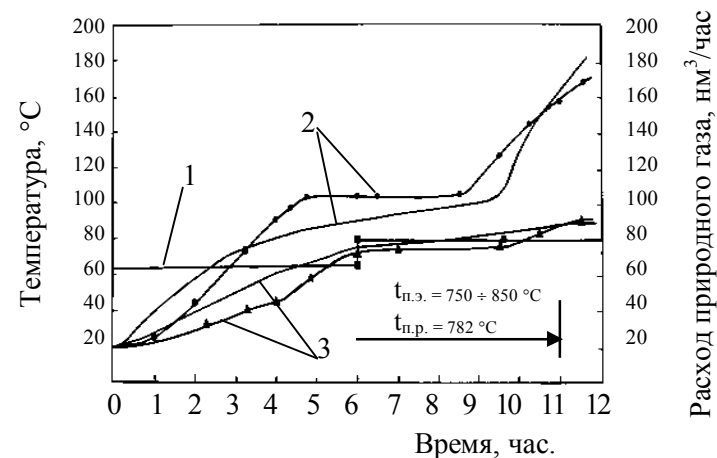


Рис. 2 - Динамика температур в характерных точках 220-т сталеразливочного ковша с набивной футеровкой в процессе первых 12-ти часов сушки и разогрева природным газом:

1 – расход природного газа; 2 – температура на стыке рабочего и арматурного слоёв футеровки стен; 3 – температура корпуса стен; сплошные линии – результаты расчётов; точками отмечены экспериментальные данные; $t_{п.э.}$ и $t_{п.р.}$ – соответственно экспериментальные и расчётные значения температуры внутренней поверхности футеровки стен спустя 11 часов после начала сушки.

туры в футеровке, крышке и корпусе ковша:

$$u = u_n = \text{const}; t_i = t_n = t_{oc} = \text{const}. \quad (13)$$

Начальные условия процесса межплавочного разогрева ковша (с высушенной футеровкой) определяются известным из экспериментальных данных законом распределения температуры по сечению слоёв футеровки стен и днища ковша перед операцией.

Теплофизические свойства материалов, входящие в выражения (2)-(6),(8),(9) определяются следующим образом:

$$\rho_1(t,u) = \rho_1^{\text{сух}}(t) / (1 - u), \quad (14)$$

$$c_1(t,u) = c_1^{\text{сух}}(t) \cdot (1-u) + c_v(t) \cdot u, \quad (15)$$

$$\lambda_1(t,u) = \begin{cases} \lambda_1^{\text{сух}}(t), & x > x_{\text{фр}}, \\ \lambda_1^{\text{сух}}(t) \cdot \exp\{b \cdot (x/x_{\text{фр}})\}, & x < x_{\text{фр}}, \end{cases} \quad (16)$$

где индекс "сух" относится к параметрам сухого материала; c_v - удельная массовая теплоёмкость воды; b - эмпирическая постоянная определяемая по экспериментальным данным.

Полученную систему уравнений (1)-(16) решали численными методами (с использованием явной четырехточечной разностной схемы) при заданной функции $B(\tau)$ с учётом зависимости теплофизических свойств материалов ковша и продуктов сгорания топлива от температуры и применением итерационных циклов для повышения точности расчётов.

Для проверки адекватности модели реальным процессам и адаптации расчётной схемы к конкретным условиям производства были использованы данные экспериментальных исследований процессов сушки и разогрева 220-т сталеразливочных ковшей мартеновского цеха МК "Азовсталь" [2].

Из сопоставления представленных на рис.1,2 результатов расчёта и экспериментов видно, что модель достаточно хорошо описывает реальный процесс межплавочного разогрева ковша, а также качественно правильно описывает динамику процесса сушки влажной футеровки при удовлетворительном соответствии между экспериментальными и расчётными данными.

Выводы

Разработана функционально-детерминированная математическая модель процессов сушки и разогрева футеровки металлургических ковшей. Адекватность модели реальным процессам установлена на основе сравнительного анализа экспериментальных и расчётных данных по динамике температур в характерных точках сталеразливочного ковша с набивной футеровкой в процессах сушки и межплавочного разогрева. Предлагаемая модель может быть использована при решении задач оптимизации существующих и разработки новых режимов сушки и разогрева ковшей для различных условий производства.

Перечень ссылок

1. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. - 472 с.
2. Разработка и внедрение импульсных режимов отопления стенов для сушки и разогрева сталеразливочных ковшей/ Сущенко А.А., Курдюков А.А., Койфман А.А. и др. // Металлургическая теплотехника: Сб. научн. тр. - Днепропетровск: ГМетАУ, 1999. - Т.1. - С.175-178.

Сущенко Андрей Викторович. Заведующий отделом математического моделирования и оптимизации теплотехнологических процессов и агрегатов ПНИЛ, окончил Мариупольский металлургический институт в 1984 г. Основные направления научных исследований - математическое моделирование и энергооптимизация теплотехнологических процессов и систем; разработка и внедрение энергоресурсосберегающих технологий металлургического производства.

Безчерев Александр Сергеевич. Ассистент кафедры ТТМП, окончил ПГТУ в 1996 г. Основные направления научных исследований - математическое моделирование и энергооптимизация теплотехнологических процессов и систем; разработка и внедрение энергоресурсосберегающих технологий металлургического производства.